



Betonin kosteusmittalaitteiden vertailututkimus

Jukka Pullinen

OPINNÄYTETYÖ
Lokakuu 2019

Rakennusalan työnjohdon tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennusalan työnjohdon tutkinto-ohjelma

Pullinen Jukka
Betonin kosteusmittalaitteiden vertailututkimus

Opinnäytetyö 44 sivua.
Lokakuu 2019

Rakentamisen kosteudenhallinnasta on käyty viime aikoina paljon keskustelua, koska asuntojen kosteus- ja sisätilaongelmat ovat kiusanneet monia ihmisiä. Asiaan on herätty myös lainsäätäjän taholta, sillä tammikuun alusta 2018 astui voimaan ympäristöministeriön asetus 782/2017 rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Asetuksen määräyksillä pyritään parantamaan rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessia. Yksi käytännön toimintamalli asetuksen määräysten toteuttamiseksi on Kuivaketju10, joka on ympäristöministeriön ja Oulun rakennusvalvonnan kehittämä ja RALA ry:n hallinnoima järjestelmä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli löytää työmaakäyttöön parhaiten soveltuva langaton betonin kosteusmittalaite, jonka antaman mittaustiedon perusteella hallitaan betonirakenteen kuivumista suunnitellussa aikataulussa ja varmistetaan betonipinnan oikea-aikainen päällystyksen aloitus. Opinnäytetyössä testattiin neljän eri mittalaitteen toimintaa työmaaolosuhteissa ja vertailtiin niiden antamia mittaustuloksia Vaisalan HMP40S-mittapään antamiin tuloksiin. Vertailututkimusta varten laadittiin mittaussuunnitelma, jonka mukaisesti betonin suhteellisen kosteuden mittaukset toteutettiin. Rakennuksen sisätilojen olosuhdehallinta toteutettiin rakennushankkeen kosteudenhallintasuunnitelmassa esitettyjen vaatimusten mukaisesti.

Vertailututkimuksen tuloksena löydettiin kaksi potentiaalista langatonta mittalaitetta betonin suhteellisen kosteuden seurantamittaukseen. Kummallakin testatulla mittalaitteella saadaan helposti jatkuvaa ja suhteellisen tarkkaa mittaustietoa betonirakenteen kuivumistrendistä. Mittalaitteiden absoluuttinen tarkkuus ei kuitenkaan vielä riitä siihen, että pelkästään niiden antaman mittaustiedon perusteella voitaisiin riittävän tarkasti arvioida betonirakenteen kuivumisaikaa ja päällystettävyyttä. Mittalaitteiden absoluuttista suhteellisen kosteuden mittaustarkkuutta voidaan kuitenkin parantaa kalibroimalla mittaustulos Vaisalan HMP40S-mittapään antaman referenssimittauksen perusteella. Lopuksi on varmistettava vielä asiantuntijan tekemällä kosteusmittauksella, että betonirakenteen suhteellinen kosteus on riittävän matala päällystystoimenpiteiden aloittamiseksi.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Site Management

Pullinen Jukka
Comparative study of concrete humidity measuring device

Bachelor's thesis 44 pages.
October 2019

There has been a lot of debate about the humidity management in construction lately, because many people have been tempted by the problems of humidity and interior space in their homes. It has also been to wake up by the legislature, since the beginning of January 2018 entered into force on the moisture-technical functioning of the buildings regulation 782/2017 of the Ministry of Environment. The provisions of the regulation aim to improve the moisture management process in the construction project. One practical approach to implementing the regulation is Kuivaketju10, which is a system developed by the Ministry of the Environment and the Oulu Building control and managed by RALA Ry.

The aim of this thesis was to find the most suitable wireless concrete humidity measuring device for site use, based on the measurement data provided to control the drying of the concrete structure in the planned time frame and ensure the timely coating start of the concrete surface. The thesis tested the performance of four different measuring devices in site conditions and compared the results with the Vaisala HMP40S probe. A measurement plan was developed for the comparative study, according to which the relative humidity measurements of concrete were carried out. The interior condition management of the building was carried out according to the requirements of the moisture management plan of the construction project.

As a result of a comparative study, two potential wireless measuring devices were found for monitoring the relative humidity of concrete. Both tested instruments provide easy, continuous and relatively accurate measurement data on the drying trend of the concrete structure. However, the absolute accuracy of the measuring device is not yet sufficient to provide a sufficiently accurate estimation of the drying time and coating of the concrete structure. The absolute relative humidity measurement accuracy of the measuring devices can be improved by calibrate the measurement result based on the reference measurement of the Vaisala HMP40S probe. Finally, it is necessary to ensure that the relative humidity of the concrete structure is sufficiently low to initiate the coating operations by means of a moisture measurement by an expert.

Key words: humidity control, concrete, wireless measuring device, humidity measurement

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	RAKENNUSHANKKEEN KOSTEUDENHALLINTA	6
2.1	Rakennusten kosteustekninen toimivuus	6
2.2	Kuivaketju10	6
3	BETONIRAKENTEEN KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN	8
3.1	Betonin kosteus.....	8
3.2	Betonin kuivuminen.....	8
3.3	Betonin kosteudenmittaus.....	9
3.3.1	Porareikämenetelmä	11
3.3.2	Näytepalamenetelmä.....	12
3.4	Kosteuden aiheuttamat päällystevauriot	12
4	TUTKIMUKSEN KULKU	14
4.1	Olosuhdehallinta	14
4.2	Mittalaitteiden käytettävyyden arviointi	16
4.3	Mittauspisteiden valinta ja arviointisyvyys	17
4.4	Aikataulu ja mittausten suorittaminen.....	18
5	LAITTEET	20
5.1	IoT – mittalaitteet betonin kosteusmittaukseen	20
5.1.1	Mittalaite 1	21
5.1.2	Mittalaite 2	22
5.1.3	Mittalaite 3	23
5.1.4	Mittalaite 4	24
5.2	Referenssimittalaite.....	26
6	TUTKIMUSTULOKSET	28
6.1	Mittalaitteiden käytettävyyshanalyysi	28
6.2	Mittaustiedon käsittely ja virhetarkastelu	29
6.3	Kuivumisolosuhteiden seurantamittaus.....	33
6.4	Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus	35
6.5	Tulosten analysointi	40
7	POHDINTA	42
7.1	Mittalaitteiden käytettävyyys	42
7.2	Kuivumisolosuhteiden arviointi	42
7.3	Betonin kuivumisen seuranta	42
	LÄHTEET	44

1 JOHDANTO

Rakentamisen kosteudenhallinnan epäonnistumiset ovat olleet viime aikoina useasti esillä tiedostusvälineissä ja lehdissä. Yle uutisoi 16.10.2018, että peräti 92% suomalaisista pitää asuntojen kosteus- ja sisätilaongelmia suurena yhteiskunnallisena ongelmana. (Yle Uutiset. 16.10.2018) Tämän ihmisten huolen ymmärtää, koska kosteusongelmat vaarantavat ihmisten terveyttä ja aiheuttavat mittavia rakennusten korjauskustannuksia.

Tässä opinnäytetyössä on tehty vertailututkimusta paikalla valetun teräsbetoniholvin kosteusmittauksiin soveltuvista langattomista kosteusmittauslaitteista. Vertailututkimuksen tavoitteena on ollut löytää työmaakäyttöön parhaiten soveltuva langaton kosteusmittalaite, jolla saadaan riittävän tarkkaa jatkuvaa tietoa betoniholvin kuivumisesta ja hetkellisestä suhteellisesta kosteudesta. Tämä on erittäin tärkeää tietoa työmaalle, jotta voidaan arvioida onko yleisaikatauluun varattu betonin kuivumisaika riittävä vai pitääkö suunniteltuja kuivatustoimenpiteitä tehostaa. Jatkuvalla seurantamittauksella halutaan varmistaa se, että betonirakenteiden kuivumisesta ei tule yllättäviä viiveitä yleisaikatauluun ja että betonipinnat ovat riittävän kuivat ennen pinnoitustoimenpiteiden aloitusta.

Langattomien betonin kosteusmittauslaitteiden vertailututkimus tehtiin YIT:n rakennustyömaalla Tampereella. Kohteena oli kuusikerroksinen elementtirakenne uudisasuinkerrostalo, jossa oli paikalla valettavat betoniholvirakenteet. Tutkimuksessa tehdyt betonin kosteusmittaukset ajoittuivat välille maaliskuu – kesäkuu 2019.

2 RAKENNUSHANKKEEN KOSTEUDENHALLINTA

2.1 Rakennusten kosteustekninen toimivuus

Rakennushankkeen kosteudenhallinta alkaa rakennuksen suunnitteluvaiheessa ja jatkuu aina rakennuksen luovutukseen asti. Kosteudenhallinnalla on keskeinen rooli rakennushankkeessa, jotta rakennus toimii kosteusteknisesti oikein koko suunnitellun käyttöiän eikä kalliita korjaustoimenpiteitä tarvitse tehdä.

Tammikuun 1. päivä 2018 tuli voimaan ympäristöministeriön asetus 782/2017 rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta, jolla pyritään parantamaan rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessia. Asetus koskee sekä uuden rakennuksen suunnittelua ja rakentamista että rakennuksen laajennusta, kerrosalaan laskettavan tilan lisäämistä, korjaus- ja muutostyötä ja rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta. Asetuksella määrätään rakennuksen kosteusteknisen toimivuuden olennaiset tekniset vaatimukset sekä rakennushankkeen kosteudenhallinnan pääperiaatteet. Näitä pääperiaatteita ovat mm. rakennushankkeeseen ryhtyvän laatima kosteudenhallintaselvitys, vastaavan työnjohtajan laatima kosteudenhallintasuunnitelma sekä hankkeen kosteudenhallinnasta vastaavien henkilöiden nimeäminen. (Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 2018.)

2.2 Kuivaketju10

Kuivaketju10 on yksi tapa toteuttaa käytännössä ympäristöministeriön asetusta 782/2017 rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Siinä rakennushankkeeseen ryhtyvä sitoutuu noudattamaan tätä toimintamallia rakennushankkeen toteuttamisen ajaksi. Kuivaketju10 on alkujaan Oulun rakennusvalvonnan ja ympäristöministeriön suunnittelema toimintamalli, joka on nykyään RALA ry:n hallinnoima järjestelmä. Kuivaketju10 perustuu kosteusriskien tunnistamiseen ja niiden torjuntaan rakennushankkeen kaikissa vaiheissa. Kosteusriskien tunnistaminen ja torjunta käsitellään ”projektipankissa”, johon kaikki hankkeen nimetyt osapuolet käyvät todentamassa oman vastuualueen tehtävien onnistumisen luotettavalla tavalla esim. piirustus, valokuva tai mittausraportti. (Kuivaketju10 2015.)

Ohessa Kuivaketju10:n mukaisen riskilistan pääkohdat:

1. Rakennuksen ulkopuolelta tuleva kosteus vaurioittaa perustuksia ja lattiarakenteita.
2. Sadevesi pääsee tunkeutumaan ulkoseinärakenteen sisälle.
3. Vesikatteen läpäisevä vesi tunkeutuu aluskatteen vuotokohdista yläpohjaan.
4. Kosteutta siirtyy ilmansulkukerroksen vuotokohdista ulkoseinä- ja yläpohjarakenteisiin, jonne sitä tiivistyy vedeksi.
5. Väärin mitoitettu ja säädetty ilmanvaihto ei poista ylimääräistä kosteutta vaan pakottaa sen siirtymään rakenteisiin.
6. Vesiputkien rikkoutumiset aiheuttavat kiinteistöön laajoja vesivahinkoja.
7. Huonosti toteutetussa märkätilassa kosteus vaurioittaa ympäröivät rakenteet.
8. Kosteiden betonirakenteiden päällystäminen aiheuttaa päällystemateriaalin turmeltumisen.
9. Materiaalien ja rakenteiden kastuminen vaurioittaa rakennuksen.
10. Huonolla ylläpidolla rakennus rapistuu hitaasti mutta varmasti.

Tämä opinnäytetyö liittyy Kuivaketju10:n mukaisen riskilistan kohdan 8 kosteudenhallintaan työmaaolosuhteissa. Kohdassa 8 korostetaan erityisesti kahta asiaa. Ensinnäkin betonirakenteen kuivumiselle täytyy mahdollistaa suotuisat kuivumisolosuhteet. Käytännössä tämä tarkoittaa noin +20 °C:een lämpötilaa rakennuksen sisällä ja ilman suhteellisen kosteuden pitäisi olla alle 50% RH. Toiseksi kuivumisen etenemistä tulee seurata säännöllisillä kosteusmittauksilla ja betonipinnan pinnoituskelpoisuus tulee osoittaa asiantuntijan tekemän kosteusmittauksen perusteella. (Kuivaketju10-riskilista.)

3 BETONIRAKENTEEN KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN

3.1 Betonin kosteus

Kovettunut betoni pitää sisällään kosteutta, joka on pääosin peräisin betonin valmistamiseen käytetystä vedestä, mutta usein myös rakenteen kastumisesta rakennusaikana. Betonirakenteeseen voi tulla myös ulkopuolista kosteutta esimerkiksi maaperästä tai erilaisten vesivahinkojen seurauksena. Huokoisena materiaalina betoni pystyy myös sitomaan itseensä vesihöyryn muodossa olevaa kosteutta ympäröivästä ilmasta. (Merikallio, Niemi & Komonen 2007, s. 13)

Betonin valmistamiseen käytetty vesi sitoutuu betoniin sekä kemiallisesti (hydraatio) että fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutuneen veden määrä riippuu käytetystä sementin määrästä, mikä on vain noin 20 painoprosenttia sementin massasta. Loppu vesi sitoutuu fysikaalisesti betonin huokosrakenteeseen seinämille ja ilmatilaan. Fysikaalisesti sitoutunut vesi on haihtumiskykyistä vettä, jota poistuu betonista betonin kuivuessa. (Merikallio ym. 2007, s. 13)

3.2 Betonin kuivuminen

Betonin kuivuminen alkaa heti valun jälkeen. Osa betonissa olevasta vedestä sitoutuu kemiallisesti ja loppu vesi haihtuu ympäröivään ilmatilaan. Betonirakenteen kuivumisnopeuteen vaikuttavat mm. betonilaatu, suunniteltu rakenneratkaisu ja kuivumisolosuhteet. Aluksi kosteutta siirtyy kapilaarisesti betonirakenteen sisäosista ulkopinnalle, josta vettä haihtuu nopeasti ympäröivään ilmaan. Betonin pinnan kuivuessa kosteuden kapilaarinen siirtyminen estyy ja betonirakenteen sisällä olevan kosteuden ainoaksi siirtymismuodoksi jää diffuusio. Tällöin kosteutta siirtyy betonirakenteessa vain vesihöyryn muodossa ja se on merkittävästi hitaampaa kuin kapilaarinen kosteuden siirtyminen. Tästä johtuen myös betonin kuivuminen hidastuu sitä mukaan mitä syvemmälle betonirakennetta mennään. (Merikallio ym. 2007, s. 20)

Betonin vesihöyrynläpäisevyyteen vaikuttaa oleellisesti betonin vesisementtisuhde. Mitä pienempi vesisementtisuhde on, sitä tiiviimpää betoni on, jolloin vesihöyrynläpäisevyys betonirakenteessa pienenee. Lämpötilan nousu nostaa betonin huokosten ilmatilan vesihöyrynpainetta ja siten edesauttaa kosteuden

siirtymistä diffuusiolla. Betonin kuivumista voidaan siis tehostaa nostamalla betonirakenteen lämpötilaa. (Merikallio ym. 2007, s. 21)

Betonirakenteen paksuudella on myös merkittävä vaikutus betonin kuivumiseen. Rakenteen paksuuden kasvaessa betonin kuivuminen hidastuu merkittävästi, koska kosteus joutuu siirtymään pidemmän matkan päästäkseen haihtumiskykyiseen pintaan. Jos rakennepaksuus kaksinkertaistuu, kuivumisaika voi kasvaa jopa nelinkertaiseksi. Rakenteesta riippuen betoni pääsee kuivumaan vapaasti joko yhteen tai kahteen suuntaan. Toinen kuivumissuunnista voi olla osittain estetty esim. kuorilaatan tapauksessa. (Merikallio ym. 2007, s. 22)

Betonin uudelleen kastuminen hidastaa kuivumista merkittävästi. Mitä myöhemmässä vaiheessa valun jälkeen betoniin pääsee lisää kosteutta, sitä hitaammin tämä kosteus poistuu betonista. Esimerkiksi jo viikon rankkasade voi kasvattaa massiivisen välipohjan kuivumisaikaa useilla viikoilla. (Merikallio ym. 2007, s. 22)

Betoni kuivuu niin kauan, kunnes betonin huokosten ilmatilan suhteellinen kosteus saavuttaa tasapainokosteuden ympäröivän ilman kanssa eli molempien suhteellinen kosteus on sama. (Merikallio ym. 2007, s. 15) Mitä pienempi on ympäröivän ilman suhteellinen kosteus, sitä enemmän ilma pystyy vastaanottamaan kuivuvasta betonirakenteesta vapautuvaa vesihöyryä ja betonin kuivumisnopeus kasvaa. Tämän takia on tärkeää huolehtia rakennuksen kuivumisolosuhteista kun kuivatusvaihe alkaa. Tyypillisesti kesäaikaan rakennuksen sisäilmaa kuivatetaan esim. absorptiokuivaimilla, jolloin rakennuksen ikkunat ja ovet pitää olla suljettuina. Talviaikaan rakennuksen sisäilman kosteutta voidaan alentaa lämmittämällä ulkoilmaa ja kierrättämällä sitä talon läpi.

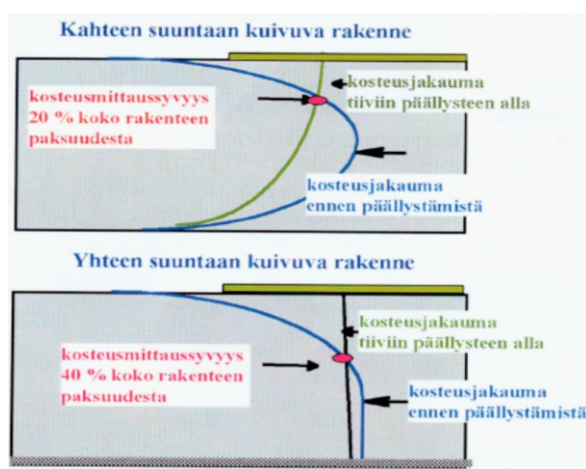
3.3 Betonin kosteudenmittaus

Betonirakenteen päällystettävyyys todetaan mittaamalla betonin suhteellista kosteutta rakenteesta riippuvalla arviointisyvyydellä. Betonista tulee mitata juuri suhteellista kosteutta, koska päällystemateriaalin sallima kosteus ilmoitetaan suhteellisenä kosteutena RH (%). Luotettavia mittausmenetelmiä ovat porareijistä ja näytepaloista tehdyt mittaukset. Helppokäyttöisiä pintakosteusosoitti-

mia ei pidä käyttää, koska ne mittaavat vain pinnan kosteutta 1-2 cm syvyydeltä eivätkä ne mittaa betonin suhteellista kosteutta. (Merikallio ym. 2007, s. 81)

Rakennustyömaalle pitää laatia kosteusmittaus suunnitelma, jossa otetaan kantaa mm. mittausmenetelmään, mittausten aikatauluun ja laajuuteen sekä mittauspisteiden sijaintiin. Ensimmäinen mittaus tehdään tyypillisesti heti kun rakenteen kuivumisen oletetaan alkavan eli kun rakenne on säältä suojassa ja sisällä on riittävästi lämpöä. Mittauspisteitä valitaan tyypillisesti vähintään kaksi kappaletta per kerros mutta jos päällystemateriaaleja on useita erilaisia niin silloin mittauspisteiden määrää pitää vastaavasti kasvattaa. Mikäli tiedetään, että jokin rakenteen osa on kastunut pahoin rakennustyön aikana, suositellaan tälle alueelle tehtäväksi vielä erillisiä lisämittauksia. (Merikallio 2002, s. 20)

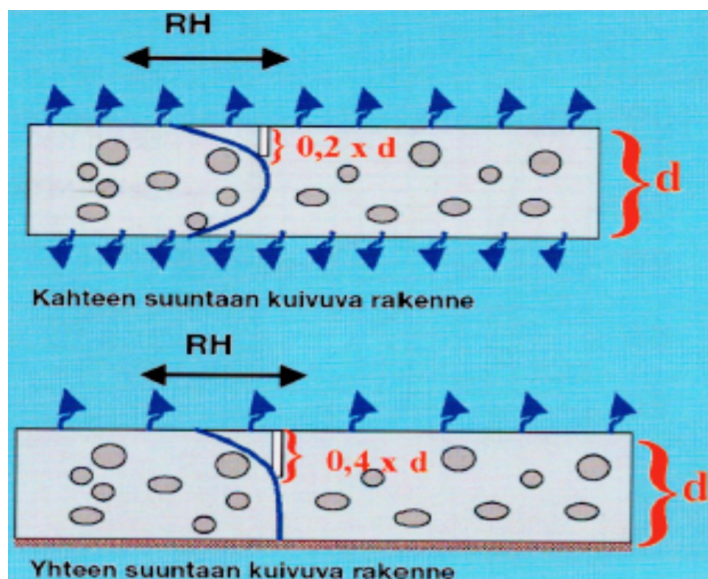
Betonirakenteen kuivuessa rakenteeseen muodostuu kosteusjakauma, jossa kosteus on sitä suurempi mitä syvemmälle rakenteeseen mennään. Kuvassa 1 on esitetty tämä periaate kahteen ja yhteen suuntaan kuivuville rakenteille.



KUVA 1. Yhteen ja kahteen suuntaan kuivuvien betonirakenteiden kosteusjakaumat. (Merikallio 2002, s. 23)

Kuvassa 2 on esitetty mittaussyvyyydet kahteen ja yhteen suuntaan kuivuvalla massiiviselle teräsbetonirakenteelle kuten välipohja tai seinä. Kahteen suuntaan kuivuvalla rakenteelle mittaussyvyys eli arviointisyvyys lasketaan kaavalla $0,2 \times d$, missä d on kuvassa 2 näkyvä rakenteen paksuus. Vastaavasti yhteen suuntaan kuivuvalla rakenteelle laskentakaava on $0,4 \times d$. Lisäksi suhteellista kosteutta pitää mitata myös pinnasta 0-10 mm sekä 20-30 mm syvyydeltä, jotta

tiedetään onko betoni riittävän kuivaa pintaosistaan päällystystoimenpiteiden aloitusta varten. (Merikallio 2002, s. 24)



KUVA 2. Yhteen ja kahteen suuntaan kuivuvien betonirakenteiden arviointisyvyyden laskenta. (Merikallio 2002, s. 41)

3.3.1 Porareikämenetelmä

Porareikämenetelmää suositellaan käytettäväksi vain silloin, kun betonin lämpötila on välillä $+15^{\circ}\text{C} \dots +25^{\circ}\text{C}$. Mikäli betonin lämpötila on tämän suosituslämpötila-alueen ulkopuolella, voi siitä aiheutua suuria virheitä mittaustuloksiin. Olosuhteiden pitää myös pysyä vakaina (maksimi lämpötilaero ilman ja betonirakenteen välillä 2°C) koko mittaustapahtuman ajan eli vähintään 3 vuorokautta. Porareikämenetelmässä käytetään mittapäätä, joka asennetaan betoniin porattuun reikään. Ennen mittausten aloittamista pitää varmistaa, että mittapää on kalibroitu asianmukaisesti. Kalibroinnilla tarkoitetaan anturin mittaaman suhteellisen kosteuden näyttämän vertaamista tunnettuun arvoon esim. kylläisen suolaliuoksen tasapainokosteuteen. Näyttämää säädetään kalibroitikertoimella niin, että anturi näyttää samaa suhteellisen kosteuden arvoa kuin mikä on tunnetun kylläisen suolaliuoksen tasapainokosteus.. Mittausreikä porataan tarkasti siihen syvyyteen mitä rakenteen arviointisyvyydeksi on määritetty. Reikä porataan kuivamenetelmällä yleensä noin 16 mm halkaisijalle. Porauksen jälkeen reikä tulee puhdistaa huolellisesti esimerkiksi pölymurilla. Reikään jäänyt pöly antaa yleensä virheellisesti liian korkeita kosteusmittaustuloksia. Koska mittaustulos halutaan reiän pohjalta eli arviointisyvyydeltä, pitää reikä putkittaa ja tiivistää huolellisesti reiän sivuilta ja päältä. Ennen mittauksen suorittamista annetaan

kosteuden tasaantua mittausreiässä 3 vuorokautta. Sen jälkeen asennetaan mittausputkeen mittapää, jonka annetaan vielä tasaantua vähintään 1 tunti ennen mittausarvojen lukua. Mittausarvoista kirjataan ylös vähintään betonin suhteellinen kosteus ja lämpötila. (Merikallio 2002, s. 12–16)

3.3.2 Näytepalamenetelmä

Näytepalamenetelmää suositellaan käytettäväksi silloin, kun betonin lämpötila on välillä -20°C ... $+80^{\circ}\text{C}$ tai olosuhteet ovat muuten epävakait. Näytepalamenetelmässä betoniin tehdään 50-100 mm halkaisijaltaan oleva reikä esimerkiksi piikkaamalla haluttuun arviointisyvyyteen. Reiän pohjalta irrotetaan betonin palasia, jotka puhdistetaan hyvin ja laitetaan koeputkeen yhdessä mittapään kanssa. Putken pää suljetaan tiiviisti ja kosteuden annetaan tasaantua noin 5-10 tuntia. Tasaantumisen jälkeen luetaan mittausarvot ja kirjataan ne ylös. (Merikallio ym. 2007, s. 84)

3.4 Kosteuden aiheuttamat päällystevauriot

Betonirakenteen sisäosa kuivuu hitaasti tasapainokosteuteen ympäröivän ilman kanssa. Päällystettävyyden kannalta ongelmallisinta on betonirakenteen sisään jäävä ylimääräinen kosteus, jonka pH on usein myös korkea. Tämä kosteus voi aiheuttaa päällystemateriaaleissa ja niiden kiinnitysaineissa vaurioita, mikäli betonirakenteesta vapautuu rakennusajan jälkeen kosteutta liian nopeasti päällysteen alle. (Merikallio 2002, s. 23)

Todellinen kriittinen kosteus riippuu betonin ja pintarakenteiden vesihöyrynläpäisyominaisuuksista. Jos pintarakenteiden vesihöyrynläpäisy on hitaampaa kuin betonin sisäältä pintaan siirtyvä vesihöyry, voi kosteus päällysteen alla nousta kriittisen korkeaksi ja aiheuttaa monia ongelmia. (RT 14-10984, s. 14)

Betonirakenteesta vapautuvan kosteuden kannalta oleellista on betonin huokosten ilmatilan suhteellinen kosteus. Tästä syystä betonirakenteiden päällystettävyydskosteusraja-arvot ilmoitetaan suhteellisenä kosteutena. (Merikallio ym. 2007, s. 17) Tyypillisesti tämä betonin suhteellisuuden kosteuden yläraja on 80-90 % mutta se on aina varmistettava päällystekohtaisesti. Käytännössä riittää, että tämä päällystekohtainen suhteellisen kosteuden raja-arvo alitetaan betonirakenteen paksuudesta riippuvaisella arviointisyvyydellä. Taulukossa 1 on esi-

tetty muutamia tyypillisiä sallittuja betonin suhteellisen kosteuden arvoja rakenteesta riippuvalla arviointisyvyydellä. (Merikallio ym. 2007, s. 20)

TAULUKKO 1. Tyypillisiä betonin suhteellisen kosteuden sallittuja arvoja rakenteesta riippuvalla arviointisyvyydellä. (Merikallio ym. 2007, s 50–66)

päällystemateriaali	sallittu betonin % RH
muovimatot	85
kumimatot	85
muovi-, kumi-, linoleumlaatat	90
mosaiikkiparketti	85
lautaparketti	85
laminaatti	85
keraamiset laatat	90

4 TUTKIMUKSEN KULKU

Tämän vertailututkimuksen pääpaino oli arvioida eri mittalaitteiden käytettävyyttä työmaaolosuhteissa sekä laitteiden mittaamien kosteus- ja lämpötila-arvojen tarkkuutta ja luotettavuutta. Tutkimuksen toteuttamista varten laadittiin tutkimussuunnitelma, jonka mukaisesti vertailututkimus toteutettiin. Seuraavassa on esitelty tutkimuksen kulku pääkohdittain.

4.1 Olosuhdehallinta

Kuivumisolosuhteiden hallinta on yksi keskeisimmistä asioista, jotta betonirakenteet kuivuvat suunnitellun yleisaikataulun mukaisesti. Tämän takia myös tälle rakennushankkeelle tehtiin kosteudenhallintasuunnitelma, jonka mukaisesti toimittiin rakentamisen eri vaiheissa.

Rakennuksen kuivatusvaihe ajoittui vuodenajallisesti talveen. Kosteudenhallintasuunnitelmaan oli määriteltä, että rakennuksen sisäilman lämpötila pidetään noin 20°C asteessa. Rakennusta lämmitettiin aluksi ennen kaukolämmön käyttöönottoa öljylämmitteisellä lämpöpuhalluksella eli lämpökontilla. Lämpökontin tuottama lämpöteho (maksimi 310 kW) johdettiin puhaltimen kautta hissikuilussa kulkevaan runkokanavaan. Runkokanavasta kuuma puhallusilma jaettiin eri kerroksiin niin, että rakennukseen saatiin tasainen lämpötila joka kerrokseen. Rakennuksen rakenteiden ja sisäilman lämpötilaero pyrittiin pitämään korkeintaan 2°C asteessa.



KUVA 3. Lämpökontti.



KUVA 4. Lämpöpuhalluksen runkokanava.

Kosteudenhallintasuunnitelmaan oli lisäksi määritelty, että rakennuksen sisäilman suhteellinen kosteus pidetään alle 50% RH. Rakennuksen sisäilmaa kuivattiin yhdistelmäkuivaimilla, joissa oli sekä absorbtio ja kondensio kuivausominaisuudet. Kuivaimia sijoitettiin 3 kappaletta kerrosta kohti. Ne tuottivat myös noin 3 kW lämpötehon per laite.



KUVA 5. Yhdistelmäkuivain.

Rakennuksen sisäilman lämpötilaa ja kosteutta seurattiin jatkuvalla mittauksella, jolla kontrolloitiin kosteudenhallintasuunnitelmassa määriteltyä kuivumisolosuhdetta.

4.2 Mittalaitteiden käytettävyyden arviointi

Mittalaitteiden käytettävyyden vertailemiseksi tutkimukseen valittiin seuraavia arviointikriteerejä:

TAULUKKO 2. Käytettävyyksanalyysin arviointikriteerit.

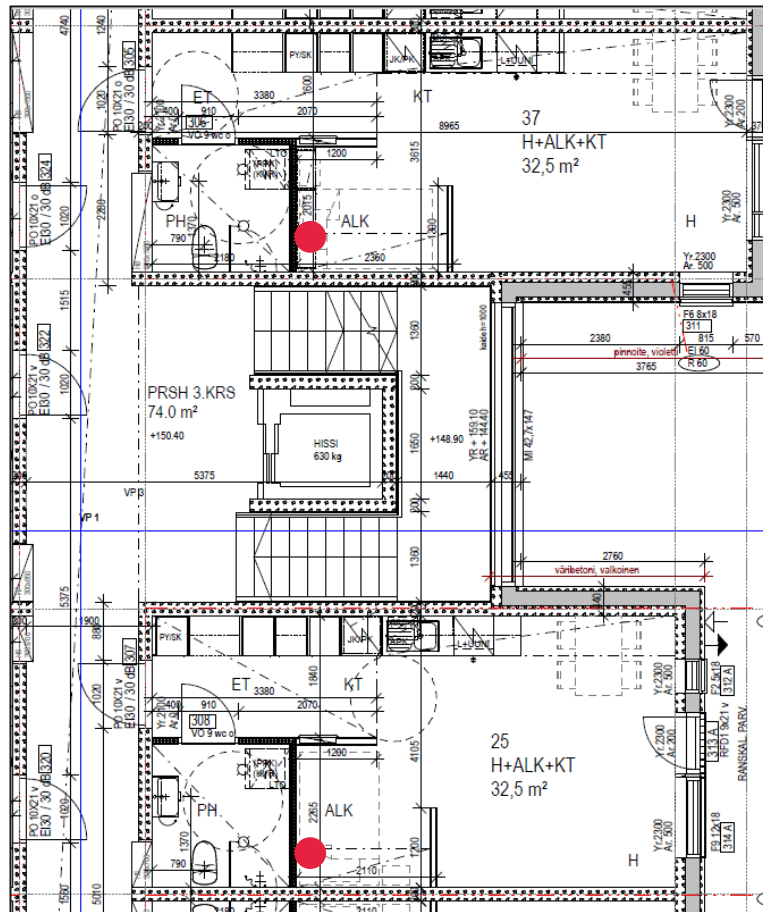
mittapään asennuspaikka valittavissa vapaasti	eri asennussuunnat (lattia, seinä, katto) ja vapaa sijoittelu
mittapään mekaanisen asennuksen helppous	vähäinen asennustyön tarve
mittapään mekaanisen asennuksen tarkkuus	asennettavissa tarkasti haluttuun arviointisyvyyteen
mittapään vaihtomahdollisuus	vaihdettavissa kesken mittausjakson
mittalaitteen olosuhdekestävyys	kestää työmaaolosuhteita (lämpötilavaihteluita, vettä, pölyä, likaa, iskuja jne)
mekaanisen vaurioitumisen sieto	asennustavasta johtuva vaurioitumisriski
tiedonsiirron helppous	helppo käyttöönotto ja laitteen käyttö
tiedonsiirron lähetysvarmuus	ei tiedonsiirtokatkoksia
pilvipalvelun käyttöliittymä	selkeä ja helppo tiedon analysointi

Mittalaitteen käytettävyyden kannalta tärkeimmät kriteerit olivat mekaanisen asennuksen tarkkuus, mittapään vaihtomahdollisuus, olosuhdekestävyys ja tiedonsiirron lähetysvarmuus. Mekaanisen asennuksen tarkkuus ja mittapään viikaantuminen vaikuttavat suoraan mittaustuloksen luotettavuuteen. Olosuhdekestävyys vaikuttaa laitteen toimintavarmuuteen ja tiedonsiirron lähetysvarmuus vaikuttaa mittaustiedon saatavuuteen pilvipalvelusta.

4.3 Mittauspisteiden valinta ja arviointisyvyys

Mittauspisteitä valittiin tutkimukseen yhteensä neljä kappaletta. Kaksi kappaletta kolmannessa kerroksesta ja kaksi kappaletta viidennestä kerroksesta. Mittauspisteiden sijainti valittiin seuraavien kriteerien mukaisesti:

- pesuhuoneen lattian välittömässä läheisyydessä
- suojaisessa paikassa, kaukana kulkuväylästä
- suojassa suoralta auringonpaisteelta ja ilmvirtaukselta



KUVA 6. Mittauspisteiden sijoitus huoneistoihin 25 ja 37.

Kuvassa 6 on esitetty mittauspisteiden sijainti punaisella ympyrällä kolmannen kerroksen pohjapiirustuksessa huoneistoissa 25 ja 37. Viidennen kerroksen mittauspisteet olivat samoilla pystylinjoilla huoneistoissa 51 ja 61.

Paikalla valetun teräsbetoniholvin nimellinen paksuus d oli 260 mm. Betonirakenne pääsee kuivumaan molempiin suuntiin, jolloin betonin suhteellisen kosteuden arviointisyvydeksi saatiin 52 mm kaavalla $0,2 \times d$. (Merikallio 2002, s. 24)

Tätä syvyyttä käytettiin mittausantureiden asennussyvyytenä lattian yläpinnasta mitattuna. Normaalisti betonin suhteellisen kosteuden mittauksissa käytetään kahta eri arviointisyvyyttä mutta tässä tutkimuksessa siihen ei ollut tarvetta, koska kyseessä on mittalaitteiden vertailututkimus.

4.4 Aikataulu ja mittauksen suorittaminen

Vertailumittaukset alkoivat maaliskuun alkupuolella heti kun kuivumisolosuhteet saatiin vakioitua. Mittauksia tehtiin yhtäjaksoisesti aina kesäkuun alkupuolelle asti eli yhteensä noin kolme kuukautta. Mittausarvoja kertyi päivittäin noin 100 kappaletta per mittapää eli yhteensä kymmeniä tuhansia arvoja koko tutkimuksen aikana. Tämä asetti oman haasteen mittautulosten analysointiin. Vähempikin määrä mittausarvoja olisi hyvin riittänyt mutta tämän vertailututkimuksen puitteissa ei ollut mahdollistakaan lähteä muuttamaan mittalaitteille asetettua standardimittaustaajuutta.



KUVA 7. Mittausjärjestely huoneistossa 61.

Kuvassa 7 nähdään mittausjärjestely viidennen kerroksen huoneistossa 61. Eri toimittajien mittalaitteet sijoiteltiin noin 150 mm etäisyydelle toisistaan pesuhuoneen väliseinän viereen. Mittapääät olivat koko vertailumittausjakson ajan sa-

massa paikassa paitsi referenssimittapää. Referenssimittauksia varten porattiin yhteensä kolme eri porareikää ja mittapäättä vaihdettiin noin kuukauden välein uuteen porareikään. Tällä järjestelyllä pyrittiin vähentämään mittapään reiässä-oloajan vaikutusta referenssimittauksen mittaustarkkuuteen. Mittausjärjestely oli kuvan 7 mukainen kaikissa neljässä mittauspisteessä, paitsi että mittalaite 4 oli käytössä vain viidennessä kerroksessa.

5 LAITTEET

5.1 IoT – mittalaitteet betonin kosteusmittaukseen

Kirjainyhdistelmä IoT viittaa sanoihin Internet of Things. Tällä termillä tarkoitetaan niin sanottua esineiden Internetiä, joka merkitsee Internetin yhdistymistä langattomasti erilaisiin koneisiin ja laitteisiin. Uudenlaiselle teknologialle on asetettu kovat odotukset tulevaisuuden varalle ja sen uskotaan tuovan helppoutta ja mukavuutta ihmisten arkeen sekä töissä että kotona. (Digita)

IoT – tekniikka on otettu maailmanlaajuisesti suurella innolla vastaan ja sitä kehitetään nyt vauhdilla. Uusimmat IoT – tekniikan päätelaitteet ovat hyvin pieniä, yksinkertaisia ja erittäin energiatehokkaita. Tätä kautta uudenlainen tekniikka on tullut kustannustehokkaaksi ja pienilläkin yrityksillä on nykyään varaa tukeutua entistä älykkäämpiin ratkaisuihin arkipäiväisten pulmien äärellä. (Digita)

Tässä tutkimuksessa mukana olleet betonin kosteusmittauslaitteet käyttivät tiedonsiirtoon IoT – teknologiaa. Anturit mittasivat betonin kosteutta ja lämpötilaa itsenäisesti tietyin aikavälein ja mitattu tieto lähetettiin langattomasti Internetissä olevaan pilvipalveluun. Pilvipalvelu varastoi mittaustiedon, jossa tieto oli sitten jatkokäsiteltävissä ja analysoitavissa useilla eri ohjelmistoilla.

Kappaleissa 5.1.1 - 5.1.4 on koostettuna vertailututkimuksessa mukana olleiden mittalaitteiden teknisiä tietoja. Tarkoituksena oli koota kaikista mittalaitteista samat tekniset tiedot vertailua varten mutta valitettavasti kaikkia tietoja ei ollut toimittajilta saatavissa. Taulukoissa on esitetty ne tiedot, jotka mittalaitteista saatiin.

5.1.1 Mittalaite 1

Mittalaitteen 1 mittaussyksikkö ja tiedon lähetyksikkö on integroitu yhteen moduuliin, joka asennetaan betonirakenteeseen valun yhteydessä. Lähetyksikkö lähettää mittaustiedon edelleen Internetissä olevaan pilvipalveluun, jonne tieto tallennetaan myöhempää käsittelyä varten. Sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus voidaan mitata erillislaitteella, mutta sitä ei käytetty tässä tutkimuksessa. Taulukossa 3 on esitetty mittalaitteen 1 teknisiä tietoja.

TAULUKKO 3. Mittalaitteen 1 teknisiä tietoja.

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
Suhteellinen kosteus	
mittausalue	10...100% RH
mittaussyvyys	15...70 mm
tarkkuus	
0...90 % RH	± 3,5 % RH
90...100 % RH	± 4,0 % RH
kosteusanturi	kapasitiivinen polymeerikalvo
stabiilisuus	< 0,5 %RH / vuosi
Lämpötila	
mittausalue	-40...+85 °C
tarkkuus mittausalueella 0...+60°C	± 0,2 °C
lämpötila-anturi	PTAT

Mittalaitteeseen 1 tuli testin aikana teknisiä ongelmia, jonka takia sen mittaustuloksia ei saatu mukaan tähän vertailututkimukseen. Mittalaitteen toimittaja ilmoitti, että tekniset ongelmat on selvitetty ja että ne korjataan viipymättä uusiin tuotteisiin.

5.1.2 Mittalaite 2

Mittalaite 2 koostuu seuraavista erillislaitteista:

- asennusputki
- mittapää
- lähetin
- keskusyksikkö

Asennusputki asennetaan betonoitavaan rakenteeseen ennen valua siten, että putken pää sijoitetaan halutulle arviointisyvyydelle. Kun mittaukset halutaan aloittaa, viedään mittapää asennusputken sisään kosketukseen mittavaan betonirakenteeseen.



KUVA 8. Asennusputki asennettuna paikalleen ennen valua.

Mittaustieto betonin lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta siirtyy mittauskaapelia pitkin lähettimeen, joka lähettää mittaustiedon langattomasti keskusyksikölle. Lähetin sijoitetaan lähelle mittauspistettä ja keskusyksikkö kauemmaksi samaan tai seuraaviin kerroksiin. Teräsbetonirakenteet vaimentavat kuitenkin merkittävästi signaalin kulkua rakennuksen sisällä, joten keskusyksikön paikka on valittava niin, että lähetimen lähettämän signaalin kuuluvuus on vielä riittävän voimakas. Keskusyksikkö lähettää mittaustiedon sitten edelleen Internetissä olevaan pilvipalveluun, jonne tieto tallennetaan myöhempää käsittelyä varten. Samalla mittapäällä voidaan mitata myös kuivumisolosuhdetta eli sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta sijoittamalla mittapää sisätilaan. Taulukossa 4 on esitetty mittalaitteen 2 teknisiä tietoja.

TAULUKKO 4. Mittalaitteen 2 teknisiä tietoja.

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
Suhteellinen kosteus	
mittausalue	0...100% RH
mittaussyvyys	vapaasti valittavissa
tarkkuus	
0...90 % RH	± 1,8 % RH
90...95 % RH	± 2,3 % RH
yli 95 % RH	± 3,0 % RH
kosteusanturi	kapasitiivinen polymeerikalvo
stabiilisuus	< 0,5 % RH/vuosi
Lämpötila	
mittausalue	0...+60 °C
tarkkuus mitta-alueella 0...+40°C	± 0,5 °C
lämpötila-anturi	PTAT

5.1.3 Mittalaite 3

Mittalaite 3 koostuu seuraavista erillislaitteista:

- mittapää
- tallennusyksikkö
- olosuhdeanturi
- lisäksi tarvitaan älypuhelin tai tabletti, johon ladataan mittaustiedon lukua ja lähetystä varten oma sovellus

Mittapää asennetaan porareikään RT-kortin (RT 14-10984 2010) ohjeiden mukaisesti. Mittaustieto betonin lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta siirtyy mittaускаapelia pitkin tallennusyksikköön. Mittapää ja tallennusyksikkö sijoitetaan lähelle mittauspistettä. Tallennusyksikköön tallennettu mittaustieto lähetetään langattomasti älypuhelimeen tai tablettiin asennetun sovelluksen avulla Internetissä olevaan pilvipalveluun, jonne tieto tallennetaan myöhempää käsittelyä varten. Laitteistoon kuuluu myös tallennusyksikköön sijoitettu olosuhdeanturi, jonka mitaamat tiedot sisäilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta

lähetetään vastaavasti pilvipalveluun. Taulukoissa 5 on esitetty mittalaitteen 3 teknisiä tietoja.

TAULUKKO 5. Mittalaitteen 3 teknisiä tietoja.

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
Suhteellinen kosteus	
mittausalue	0...100% RH
mittaussyvyys	30...90 mm
tarkkuus	
0...90 % RH	± 1,8 % RH
90...100 % RH	± 2,3 % RH
yli 95 % RH	± 3,0 % RH
Lämpötila	
tarkkuus mittausalueella 0...+40°C	± 0,2 °C
Olosuhdemittaus	
toimintalämpötila-alue	-25...+60 °C
tarkkuus	
20...80 % RH	± 4,0 % RH
-25...+60 °C	± 0,5 °C
kotelon luokitus	IP52

5.1.4 Mittalaite 4

Mittalaite 4 koostuu seuraavista erillislaitteista:

- mittapää
- lähetin
- olosuhdelähetin
- keskusyksikkö

Mittapää asennetaan porareikään RT-kortin (RT 14-10984 2010) ohjeiden mukaisesti. Mittaustieto betonin lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta siirtyy mittaускаapelia pitkin lähettimeen, joka lähettää mittaustiedon langattomasti

keskusyksikölle. Mittapää ja lähetin sijoitetaan lähelle mittauspistettä ja keskusyksikkö kauemmaksi samaan tai seuraaviin kerroksiin. Teräsbetonirakenteet vaimentavat kuitenkin merkittävästi signaalin kulkua rakennuksen sisällä, joten keskusyksikön paikka on valittava niin, että lähettimen lähettämän signaalin kuuluvuus on vielä riittävän voimakas. Keskusyksikkö lähettää mittaustiedon sitten edelleen Internetissä olevaan pilvipalveluun, jonne tieto tallennetaan myöhempää käsittelyä varten. Laitteistoon kuuluu myös olosuhdelähetin, joka lähettää langattomasti mittaustietoa sisäilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta keskusyksikölle ja siitä edelleen pilvipalveluun. Taulukoissa 6, 7 ja 8 on esitetty mittalaitteen 4 teknisiä tietoja.

TAULUKKO 6. Mittalaitteen 4 teknisiä tietoja.

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
Suhteellinen kosteus	
mittausalue	0...100% RH
mittaussyvyys	30...90 mm
tarkkuus	
lämpötilaväli 0...+40°C	
0...90 % RH	± 1,5 % RH
90...100 % RH	± 2,5 % RH
Lämpötila	
mittausalue	-40...+125 °C
tarkkuus mittausalueella 0...+40°C	± 0,15 °C
Olosuhdemittaus	
toimintalämpötila-alue	-10...+45 °C
tarkkuus	
20...80 % RH	± 2,5 % RH
-40...+125 °C	± 0,3 °C
kotelon mitat (K x L x S)	100 x 67 x 35 mm
kotelon luokitus	IP67

TAULUKKO 7. Lähettimen teknisiä tietoja.

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
toimintalämpötila-alue	-20...+45 °C
kotelon mitat (K x L x S)	130 x 90 x 40 mm
kotelon luokitus	IP67

TAULUKKO 8. Keskusyksikön teknisiä tietoja.

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
yhdistettävien lähettimien enimmäismäärä	16 kpl
kantama vapaassa tilassa	3 km
käyttöliittymä	LCD näyttö ja hipaisunäppäimet
toimintalämpötila-alue	0...+45 °C
kotelon mitat (K x L x S)	175 x 120 x 50 mm
kotelon luokitus	IP67

5.2 Referenssimittalaite

Tässä vertailututkimuksessa käytettiin referenssimittalaitteena Vaisalan HMP40S-mittapäätä ja HM40-näyttölaitetta. Mittapäätä käytetään yleisesti betonin ja muiden rakenteiden suhteellisen kosteuden mittaukseen. Taulukoissa 9 ja 10 on esitetty mittapään ja näyttölaitteen teknisiä tietoja.

TAULUKKO 9. HMP40S-mittapään teknisiä tietoja. (Vaisala 2012)

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
Suhteellinen kosteus	
mittausalue	0...100% RH
mittausvyvyys	30...90 mm
tarkkuus	
lämpötilaväli 0...+40°C	
0...90 % RH	± 1,7 % RH
90...100 % RH	± 2,5 % RH
tehdaskalibroinnin epävarmuus +20°C:ssa	± 1,5 % RH
kosteusanturi	Vaisala HUMICAP® 180R
stabiilisuus	± 2 % RH kahden vuoden aikana

Lämpötila	
mittausalue	-40...+80 °C
tarkkuus mitta-alueella 0...+40°C	± 0,2 °C
lämpötila-anturi	Pt1000 RTD 1/3, luokka B IEC 751

TAULUKKO 10. HM40-näyttölaitteen teknisiä tietoja. (Vaisala 2012)

Ominaisuus	Kuvaus/arvo
toimintalämpötila-alue	-10...+60 °C
mitat (KxLxS)	184 x 72 x 44 mm
paino	240 g
kotelon luokitus	IP54
mitatut suureet	RH, T
lasketut suureet	Td, Tw, a, x, h
näyttö	LCD (140 x 160 pikseliä)
toiminta-aika	100 h (alkaliparistoilla)
EMC yhteensopivuus	EN61326-1

HMP40S-mittapäätä käytetään RT 14-10984 kortin mukaisella porareikämenetelmällä. Porareikämenetelmän vaatimat esivalmistelut ennen varsinaista suhteellisen kosteuden mittausta on kuvattu kappaleessa 3.3.1. Tämän jälkeen mittauksen suorittaminen etenee seuraavasti: (Vaisala 2012)

1. Irrota kumitulppa holkista.
2. Asenna HMP40S-mittapää holkkiin.
3. Tiivistä holkki niin, että kumitulppa on kaapelin ympärillä.
4. Liitä mittapään kaapeli HM40-näyttölaitteeseen ja kytke näyttölaitteeseen virta.
5. Vaihda suureeksi RH.
6. Vaihda kuvaajanäkymään ja odota vähintään 1h, jotta lukemat ovat taastuneet.
7. Kirjoita mitattu RH- ja lämpötila-arvo muistiin.
8. Katkaise HM40:n virta ja irrota kaapeli.

6 TUTKIMUSTULOKSET

Betonin suhteellista kosteutta, lämpötilaa sekä ympäröivän ilman kuivumisolosuhteita mitattiin mittalaitteilla 2, 3 ja 4. Mittalaitteen 1 mittaustuloksia ei ole käytettävissä näissä tuloksissa. Mittalaite 4 saatiin mukaan tähän tutkimukseen vasta huhtikuun alussa ja sillä tehtiin mittauksia vain huoneistoista 51 ja 61.

6.1 Mittalaitteiden käytettävyyssanalyysi

Käytettävyyssanalyysissä on käytetty painoarvoa, joka kuvastaa arviointikriteerin tärkeyttä käytettävyyden kannalta. Mittalaitteille annetut vertailuarvot vaihtelivat välillä 5 = kiitettävä, 4 = erittäin hyvä, 3 = hyvä, 2 = tyydyttävä ja 1 = välttävä. Kertomalla vertailuarvo painoarvolla ja laskemalla tulokset yhteen saadaan mittalaitteen kokonaisarvio, joka painottuu tärkeimmillä arviointikriteereillä.

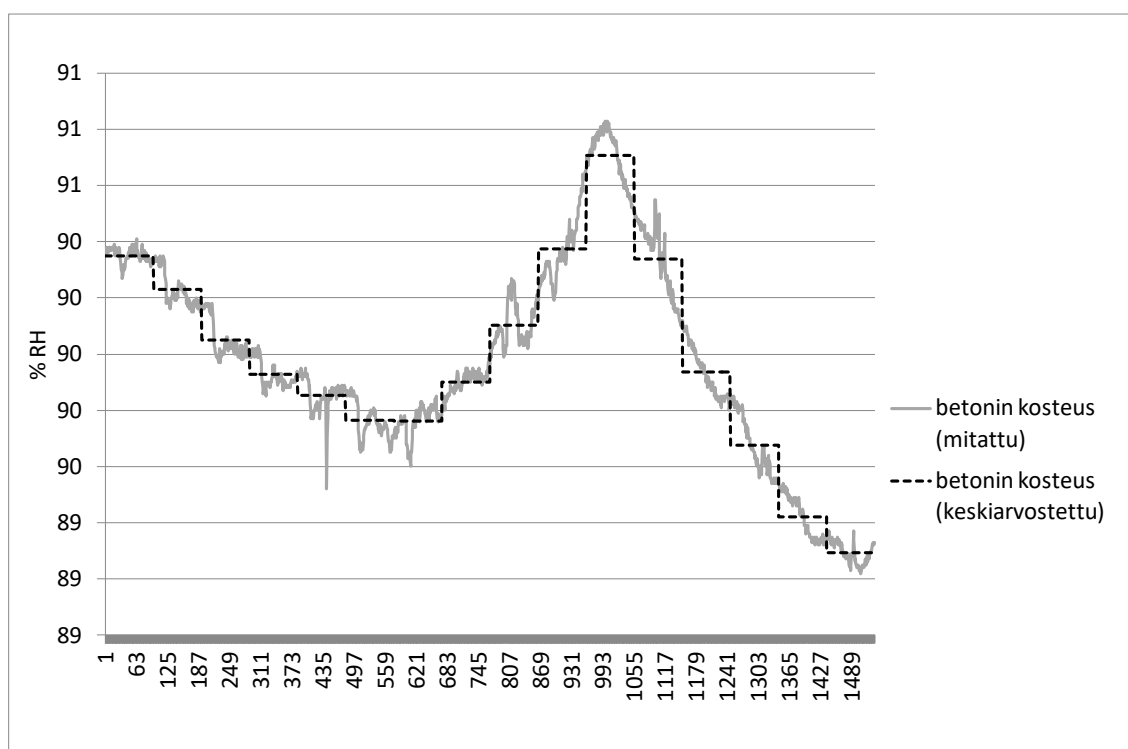
TAULUKKO 11. Käytettävyyden arviointimatriisi.

arviointikriteeri	painoarvo (1-3)	Mittalaite 1	Mittalaite 2	Mittalaite 3	Mittalaite 4
mittapään asennuspaikka valittavissa vapaasti	2	5	2	3	3
mittapään mekaanisen asennuksen helppous	1	5	2	3	3
mittapään mekaanisen asennuksen tarkkuus	3	5	2	4	4
mittapään vaihtomahdollisuus	3	1	3	5	5
mittalaitteen olosuhdekestävyys	3	1	3	3	4
mekaanisen vaurioitumisen sieto	2	4	5	3	3
tiedonsiirron helppous	2	3	3	3	4
tiedonsiirron lähetysvarmuus	3	1	2	4	4
pilvipalvelun käyttöliittymä	1	2	2	3	4
PISTEMÄÄRÄ		55	54	72	78

Mittalaitteen käytettävyyttä arvioitiin käytännön tekemisen kautta saadun kokemuksen perusteella. Mittalaitteiden saamat kokonaisarviot vaihtelivat 54 – 78 pisteen välillä.

6.2 Mittaustiedon käsittely ja virhetarkastelu

Mittaustiedon käsittely ja analysointi tehtiin Excelissä. Aluksi pilvipalveluun tallennettu mittaustieto luettiin tekstimuotoiseen tiedostoon ja siirrettiin Exceliin. Exceliin siirretystä tiedosta poimittiin mittauksen aikaleima (päivämäärä ja kellonaika) sekä vastaavana ajanhetkenä mitatut kosteuden ja lämpötilan mittauservot. Mittaukset kestivät yhtäjaksoisesti noin kolme kuukautta, jonka aikana yksittäisiä mittauservoja kertyi tuhansia kappaleita yhtä mittauspistettä kohden.

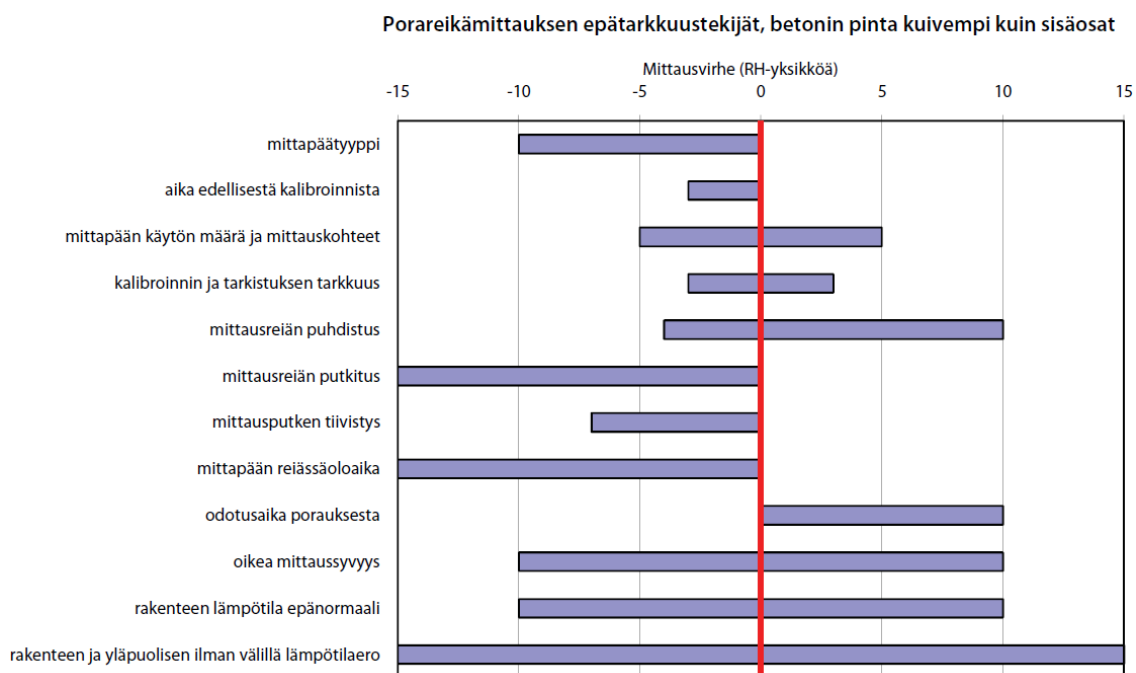


KUVA 9. Betonin kosteusmittausnäyte.

Mittauservoista laskettiin päiväkohtainen keskiarvo, joka kuvaa tarkasteltavan mittauspisteen keskimääräistä kosteutta ja lämpötilaa kyseisenä päivänä. Kuvassa 9 nähdään esimerkki, mitä tämä keskiarvostus tarkoittaa betonin kosteusmittauksen osalta. Harmaalla värillä piirretty käyrä kuvaa betonista mitattua kosteutta noin 15 päivän ajalta. Mustalla katkoviivalla piirretty käyrä kuvaa mittaustuloksista laskettua betonin kosteuden päiväkohtaista keskiarvoa. Keskiar-

vostus suodattaa mittausravot epäloogisia nopeita muutoksia ja pienentää esitettävien arvojen määrää tuhansista noin sataan.

Mittaustulokset esitetään kappaleissa 6.3 ja 6.4 graafisina käyrinä, joiden arvot on laskettu päiväkohtaisina keskiarvoina saaduista mittaustuloksista. Mikäli jonkin päivän mittaustieto puuttuu, käytetään edelliselle päivälle laskettua keskiarvoa.



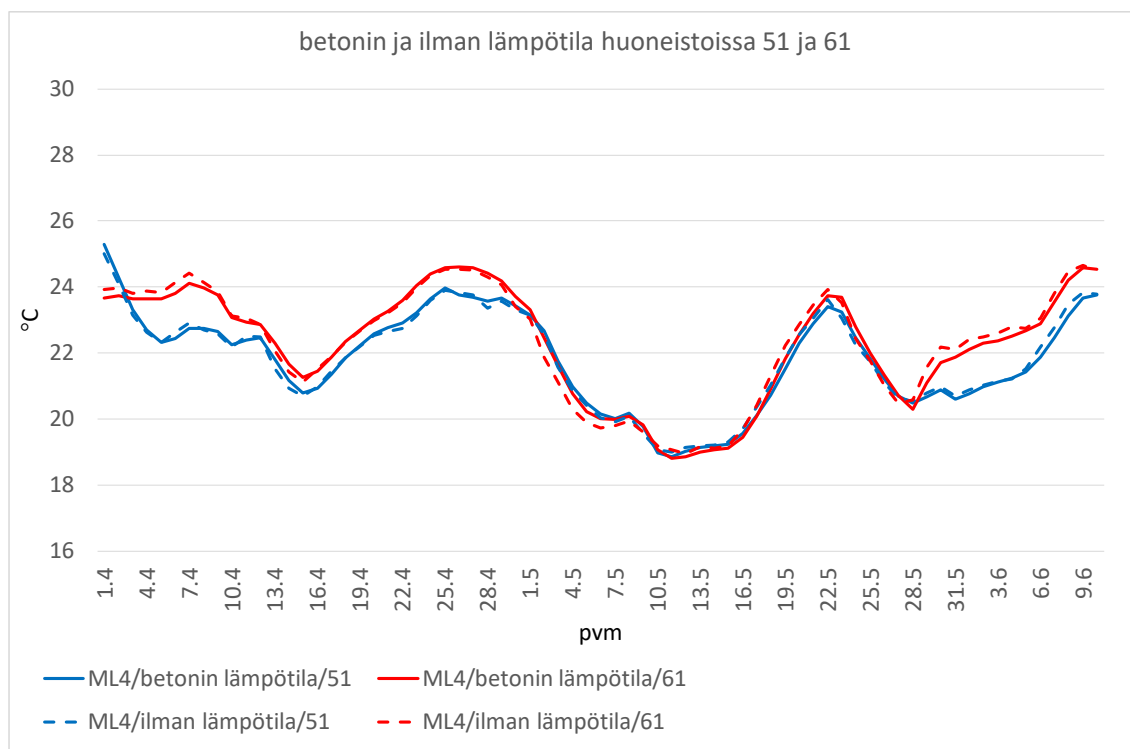
KUVA 10. Porareikämenetelmän virhelähteitä. (RT 14-10984, 2010)

Kuvassa 10 nähdään RT-kortin RT 14-10984 mukaisia tyypillisiä virhelähteitä, kun betonin suhteellista kosteutta mitataan porareikämenetelmällä. Näiden virhelähteiden vaikutusta mittaustuloksiin on käsitelty seuraavassa taulukossa:

TAULUKKO 12. Virhelähteiden vaikutus mittaustuloksiin porareikämenetelmässä.

virhelähde	virhettä pienentävä toimenpide	virheen todennäköisyys
mittapäätyyppi		taulukon mukainen
aika edellisestä kalibroinnista	toimittaja kalibroinut mittapääät ennen vertailututkimuksen aloitusta	pieni
kalibroinnin tarkkuus		taulukon mukainen
mittapään käytön määrä	mittapääät uusia	pieni
mittausreiän pudistus	tehty RT-kortin mukaisesti	pieni
mittausreiän putkitus	tehty RT-kortin mukaisesti	pieni
mittausputken tiivistys	tehty RT-kortin mukaisesti	pieni
mittapään reiässäoloaika		taulukon mukainen
odotusaika porauksesta	tehty RT-kortin mukaisesti	pieni
oikea mittaussyvyys	reiän syvyys tarkastettu	pieni
rakenteen lämpötila epänormaali	mitattu olosuhdetta	pieni
rakenteen ja yläpuolisen ilman välillä lämpötilaero	vertailtu olosuhdetta ja betonin lämpötilaa	pieni

Taulukon 12 mukaan suurin yksittäinen virhelähde on betonirakenteen ja ilman lämpötilaero. Kuvassa 11 nähdään lämpötilaeroja betonin ja ilman välillä huoneistoissa 51 ja 61. Tässä mittausesimerkissä lämpötilaero betonin ja ilman välillä oli pieni. Sama havaittiin myös muissa vastaavissa mittauksissa, joten betonirakenteen ja yläpuolisen ilman välisellä lämpötilaerolla ei ollut juurikaan vaikutusta mittaustuloksiin.



KUVA 11. Betonin ja huoneilman välisiä lämpötilaeroja huoneistoissa 51 ja 61.

Merkittävimmiksi virhelähteiksi jää taulukon 12 mukaan mittapäätyyppi -10...0 RH %, kalibroinnin tarkkuus ± 3 RH % ja mittapään reiässäoloaika -15...0 RH %.

TAULUKKO 13. Betonin suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus eri mittalaitteilla.

tarkkuus mitta- usalueella	Mittalaite 1	Mittalaite 2	Mittalaite 3	Mittalaite 4	Vaisala HMP40S
yli 95 % RH	$\pm 4,0$ % RH	$\pm 3,0$ % RH	$\pm 3,0$ % RH	$\pm 2,5$ % RH	$\pm 2,5$ % RH
90...95 % RH	$\pm 4,0$ % RH	$\pm 2,3$ % RH	$\pm 2,3$ % RH	$\pm 2,5$ % RH	$\pm 2,5$ % RH
0...90 % RH	$\pm 3,5$ % RH	$\pm 1,8$ % RH	$\pm 1,8$ % RH	$\pm 1,5$ % RH	$\pm 1,7$ % RH

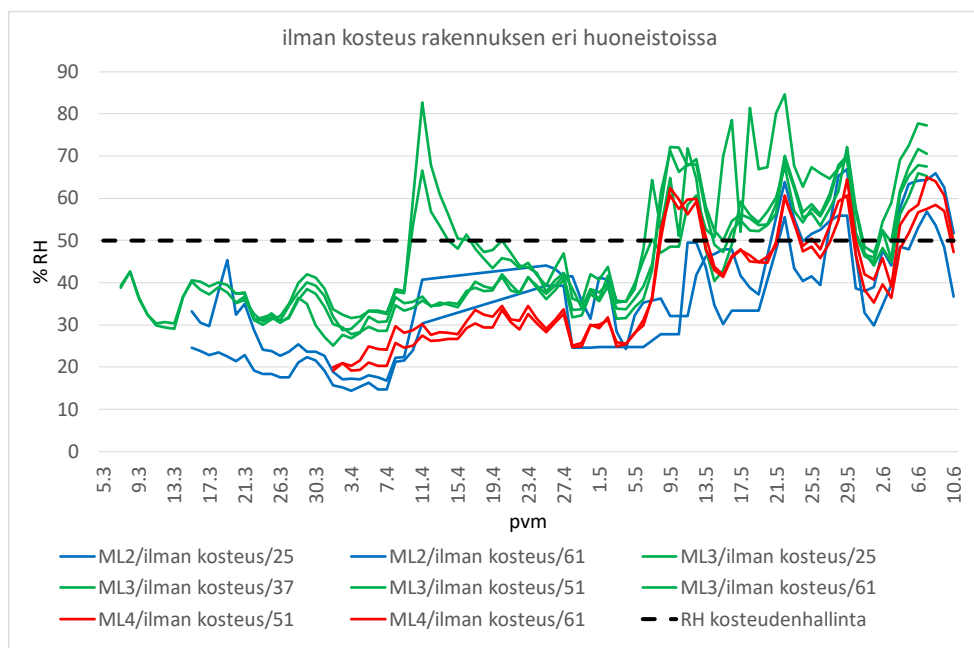
Taulukkoon 13 on koottu yhteenveto vertailututkimuksessa käytettyjen mittapäiden mittaustarkkuuksista. Mittaustarkkuus paranee kun betonin suhteellinen kosteus pienenee. Taulukosta nähdään, että referenssimittalaitteena käytetyn Vaisalan mittalaitteen mittaustarkkuus on suunnilleen samaa luokkaa kuin mitä

toimittajat ovat ilmoittaneet vertailtavien mittalaitteiden mittaustarkkuuksista. Periaatteessa referenssimittalaitteen pitäisi pystyä kertaluokkaa tarkempaan mittaustarkkuuteen, koska muita mittalaitteita verrataan sen antamiin mittaustuloksiin. Vaisalan mittapää on kuitenkin yleisesti käytetty ja hyväksytty betonin suhteellisen kosteuden mittaamiseen, joten sitä päätettiin käyttää myös tässä tutkimuksessa referenssimittalaitteena. Taulukosta voidaan päätellä, että mittausvirheen pitäisi olla $\pm 1,8 \%$ tai pienempi, kun betonin suhteellinen kosteus on 90 % RH tai sen alle. Tällöin ollaan varmalla puolella tulosten tulkinnan suhteen.

Mittapään reiässäoloajan virhevaikutusta voidaan pienentää vaihtamalla mittapää uuteen mittauspisteeseen seurantamittauksen aikana. Tätä toimenpidettä ei kuitenkaan tehty tässä tutkimuksessa, koska kahden mittalaitteen kohdalla mittauspisteen vaihtaminen ei ollut mahdollista toteuttaa.

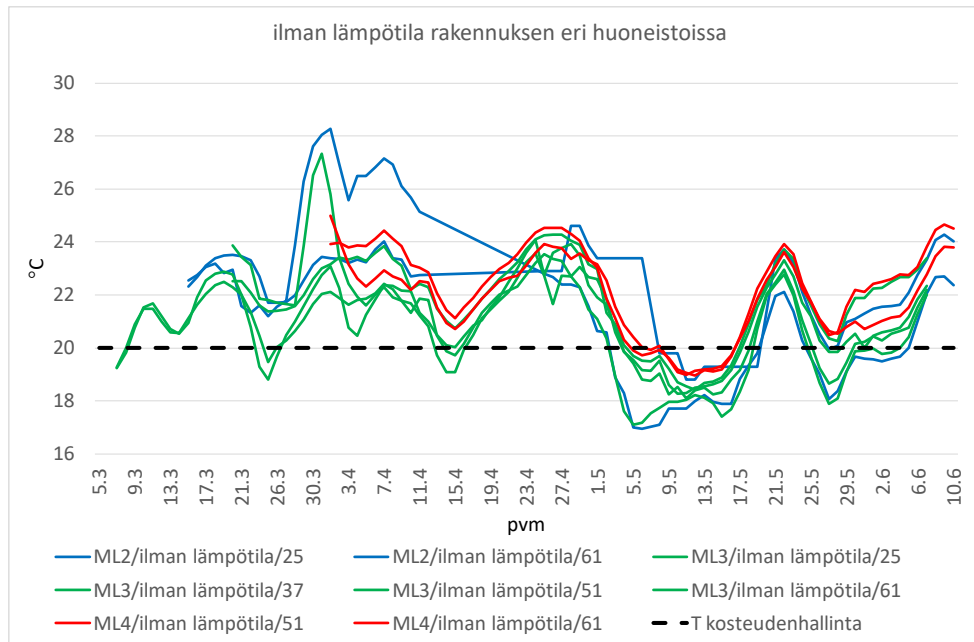
6.3 Kuivumisolosuhteiden seurantamittaus

Ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat merkittävimmät betonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät. Tässä kappaleessa on esitetty vertailussa mukana olleiden mittalaitteiden mittaustuloksia ilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta ajan funktiona. Kuvissa esitettävien käyrien selitykset on lyhennetty niin, että esimerkiksi ML2/ilman kosteus/25 tarkoittaa mittalaitteella 2 tehtyä ilman kosteuden mittausta huoneistosta 25. Muut merkinnät menevät samalla logiikalla. Mittalaitteen 2 mittaustuloksissa nähdään epäjatkuvuuskohtia, jotka johtuvat ajoittaisista tiedonsiirto-ongelmista.



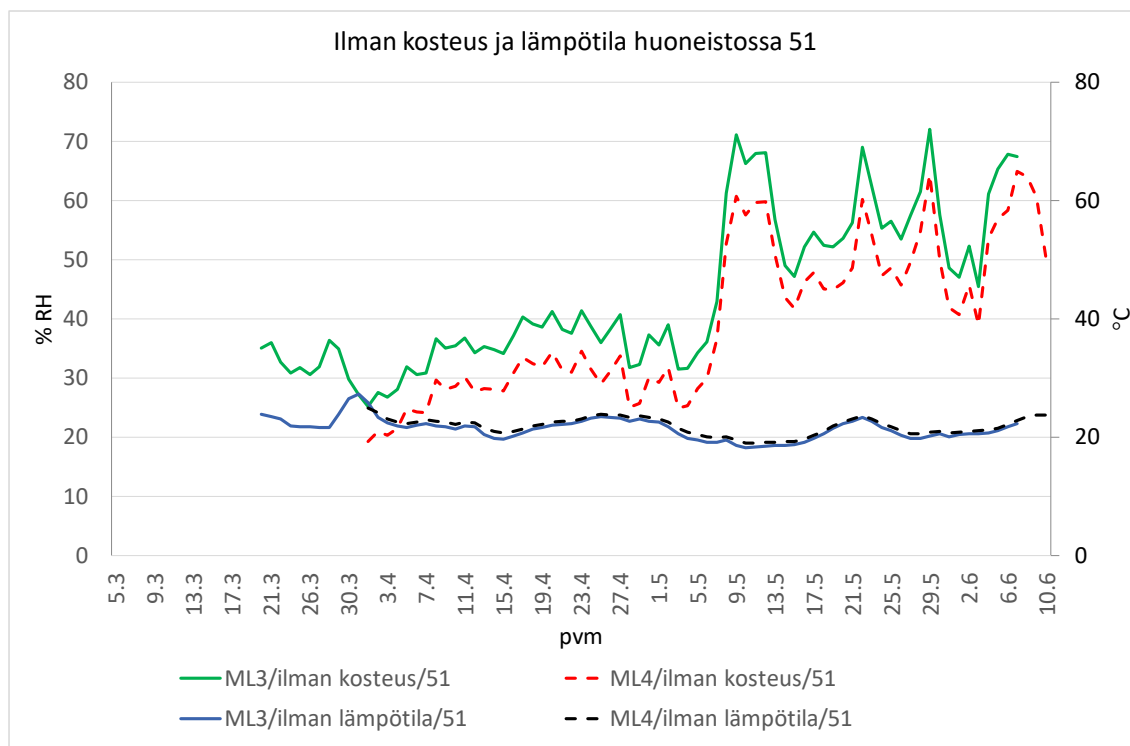
KUVA 12. Rakennuksen sisäilman kosteusmittaustulos.

Kuvassa 12 nähdään, että rakennuksen sisäilman suhteellinen kosteus oli maalisi- ja huhtikuussa pääsääntöisesti alle 50 % RH, mikä vastaa kosteudenhallintasuunnitelmassa asetettua tavoitetta.



KUVA 13. Rakennuksen sisäilman lämpötilamittaustulos.

Kuvassa 13 nähdään, että rakennuksen sisäilman lämpötila oli maalisi- ja huhtikuussa pääsääntöisesti yli 20 °C, mikä vastaa kosteudenhallintasuunnitelmassa asetettua tavoitetta.

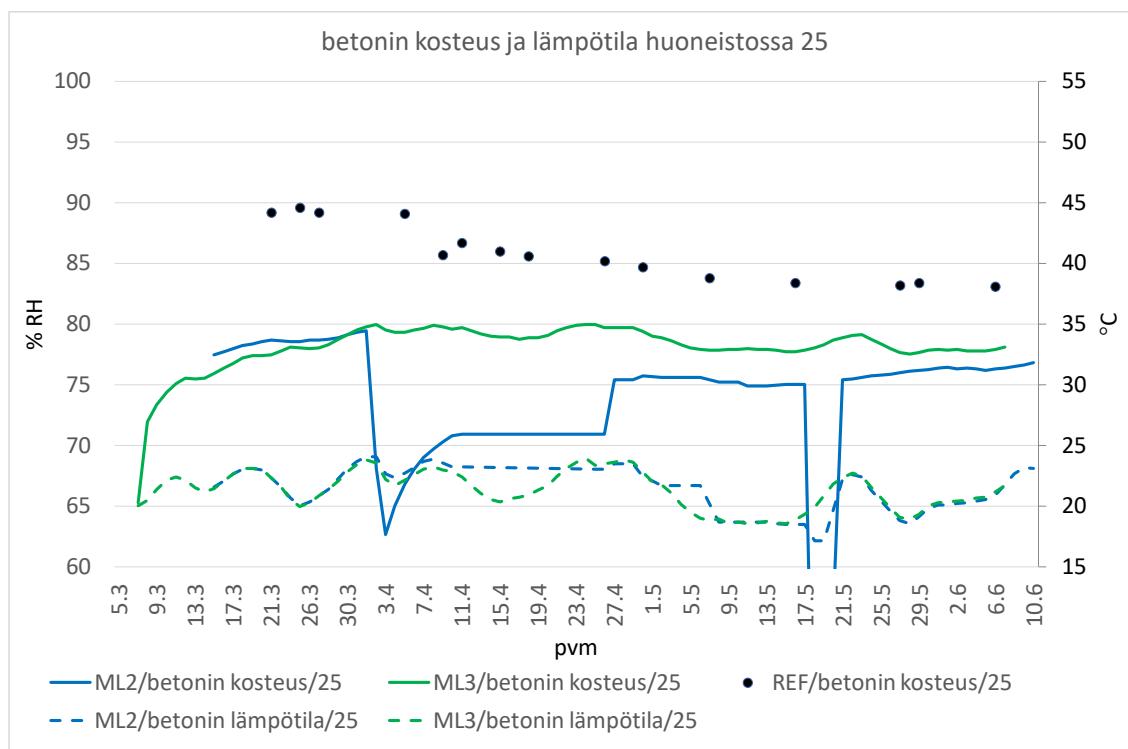


KUVA 14. Sisäilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus huoneistossa 51.

Kuvassa 14 nähdään vertailu mittalaitteiden 3 ja 4 mittaamista ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoista huoneistossa 51. Mittalaitteiden mittaamat kosteuden ja lämpötilan arvot olivat hyvin samanmuotoisia. Ilman kosteuden mittauksessa nähdään kuitenkin pieni tasoero mittalaitteiden välillä. Tämä voi johtua mm. kalibrointieroista mutta asiaa ei tutkittu tarkemmin. Vastaavia tuloksia saatiin myös muiden huoneistojen olosuhdemittauksista. Ilman kosteuden ja lämpötilan mittauksille ei tehty referenssimittauksia tässä tutkimuksessa.

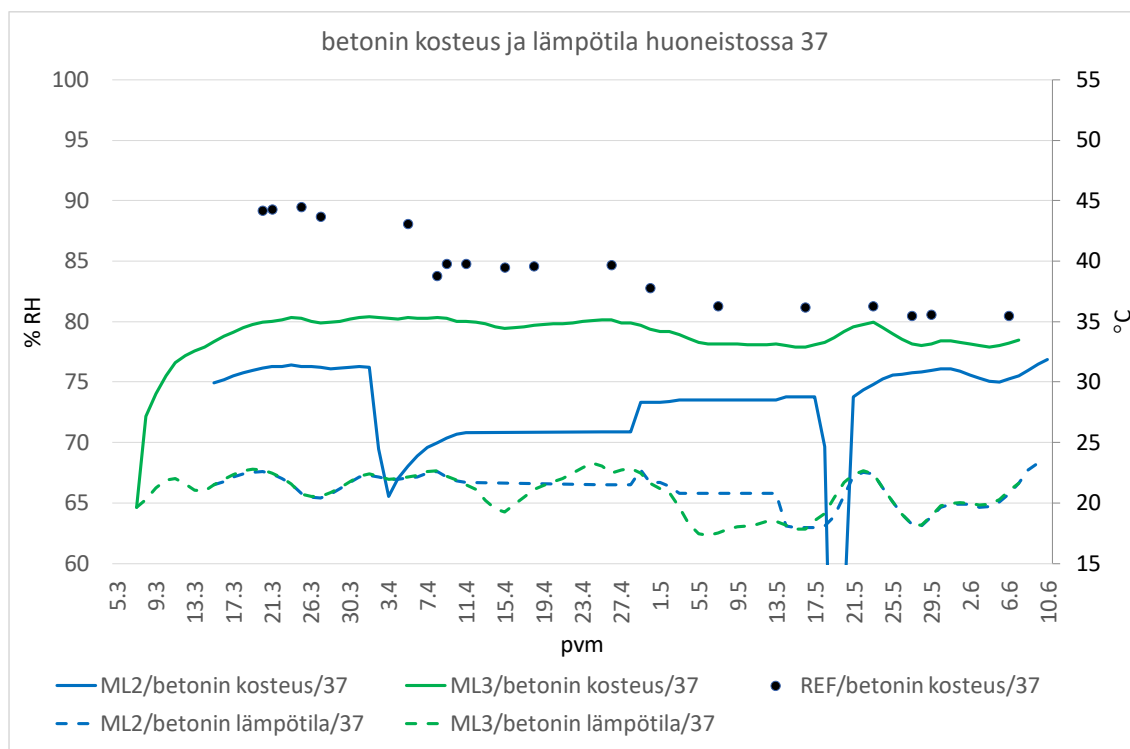
6.4 Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus

Tässä kappaleessa on esitetty vertailussa mukana olleiden mittalaitteiden mitaustuloksia betonin suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta ajan funktiona eri huoneistoista. Kuvissa esitettävien käyrien selitykset on lyhennetty niin, että esimerkiksi ML2/betonin kosteus/25 tarkoittaa mittalaitteella 2 tehtyä betonin kosteuden mittausta huoneistosta 25. Muut merkinnät menevät samalla logiikalla paitsi REF tarkoittaa referenssimittalaitteen mitaustulosta.



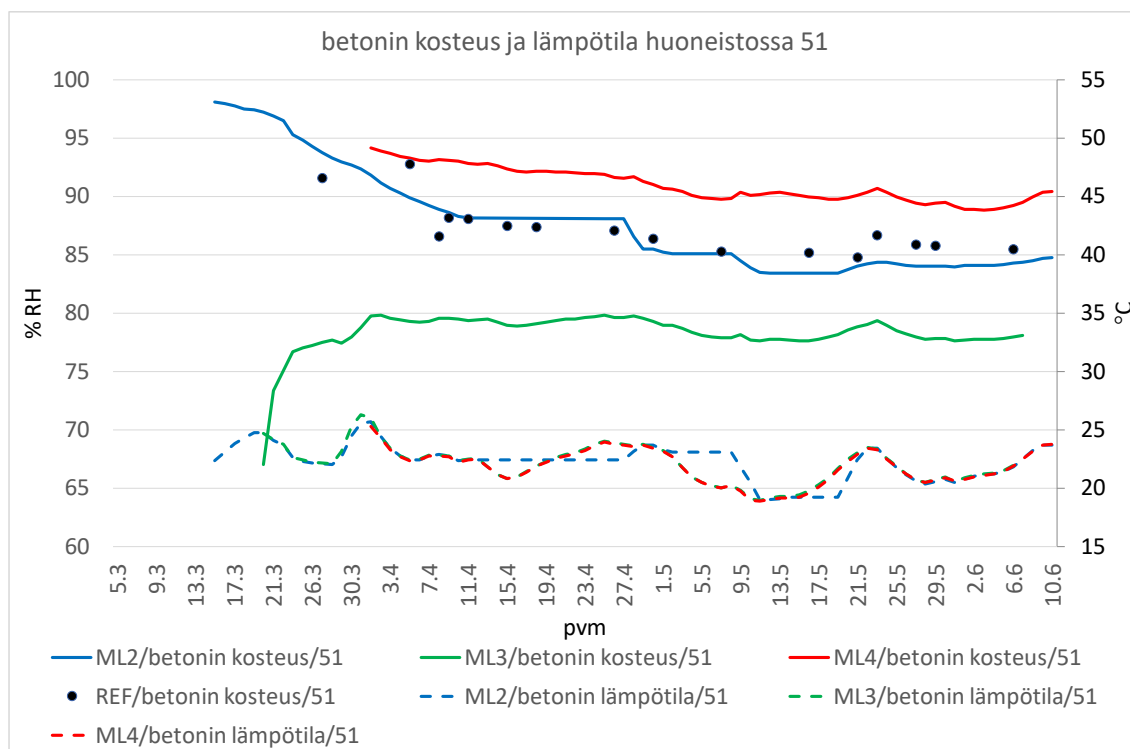
KUVA 15. Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus huoneistossa 25.

Kuvassa 15 nähdään mittalaitteiden 2 ja 3 mittaamia betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja huoneistossa 25. Mustat pisteet ovat referenssimittauksella saatuja arvoja betonin suhteellisesta kosteudesta. Mittalaitteiden 2 ja 3 mittaamat arvot olivat 5-10 % RH pienempiä kuin referenssimittauksella mitatut arvot ja poikkeavat toisistaan keskimäärin 3 % RH. Mittalaitteiden 2 ja 3 mittaamat arvot betonin lämpötiloista olivat pääosin hyvin lähellä toisiaan. Mittalaitteen 2 tiedonsiirrossa oli ajoittain ongelmia, mistä johtuu sinisissä käyrissä näkyvät epäloogisuudet. Analysoinnissa on käytetty viimeisintä mitattua arvoa jos päiväkohtaisia mittauservoja on puuttunut.



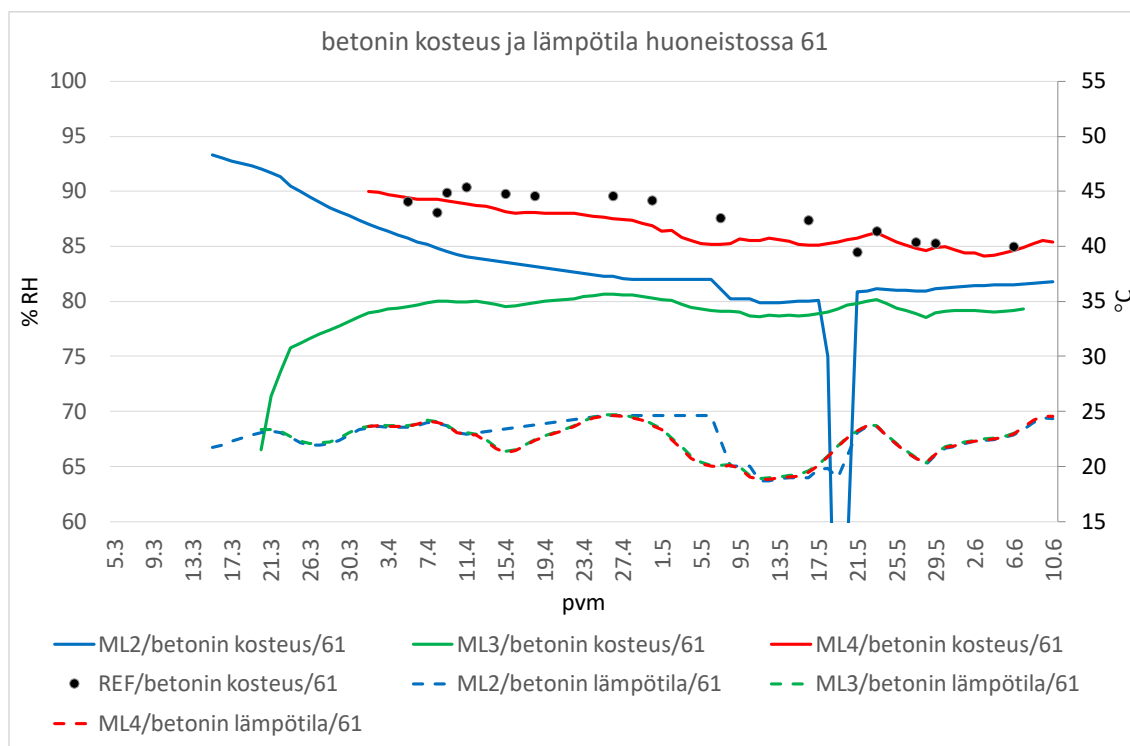
KUVA 16. Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus huoneistossa 37.

Kuvassa 16 nähdään mittalaitteiden 2 ja 3 mittaamia betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja huoneistossa 37. Mustat pisteet ovat referenssimittauksella saatuja arvoja. Mittalaitteiden 2 ja 3 mittaamat arvot olivat 3-10 % RH pienempiä kuin referenssimittauksella mitatut arvot ja poikkesivat toisistaan noin 5 % RH. Mittalaitteiden 2 ja 3 mittaamat arvot betonin lämpötiloista olivat pääosin hyvin lähellä toisiaan. Mittalaitteen 2 tiedonsiirrossa oli ajoittain ongelmia, mistä johtuu sinisissä käyrissä näkyvät epäloogisuudet. Analysoinnissa on käytetty viimeisintä mitattua arvoa jos päiväkohtaisia mittausarvoja on puuttunut.



KUVA 17. Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus huoneistossa 51.

Kuvassa 17 nähdään mittalaitteiden 2, 3 ja 4 mitaamia betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja huoneistossa 51. Mustat pisteet ovat referenssimittauksella saatuja arvoja. Mittalaitteen 2 mitaamat betonin suhteellisen kosteuden arvot olivat selvästi lähimpänä referenssimittauksella saatuja arvoja. Mittalaitteen 4 mitaamat arvot olivat säännönmukaisesti noin 5 RH % suurempia kuin referenssimittauksella mitatut arvot kun taas mittalaitteen 3 mitaamat arvot noin 5-10 RH % pienempiä. Mittalaitteiden 2, 3 ja 4 mitaamat arvot betonin lämpötiloista olivat pääosin hyvin lähellä toisiaan. Mittalaitteen 2 tiedonsiirrossa oli ajoittain ongelmia, mistä johtuu sinisissä käyrissä näkyvät epäloogisuudet. Analysoinnissa on käytetty viimeisintä mitattua arvoa jos päiväkohtaisia mittausarvoja on puuttunut.



KUVA 18. Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittaus huoneistossa 61.

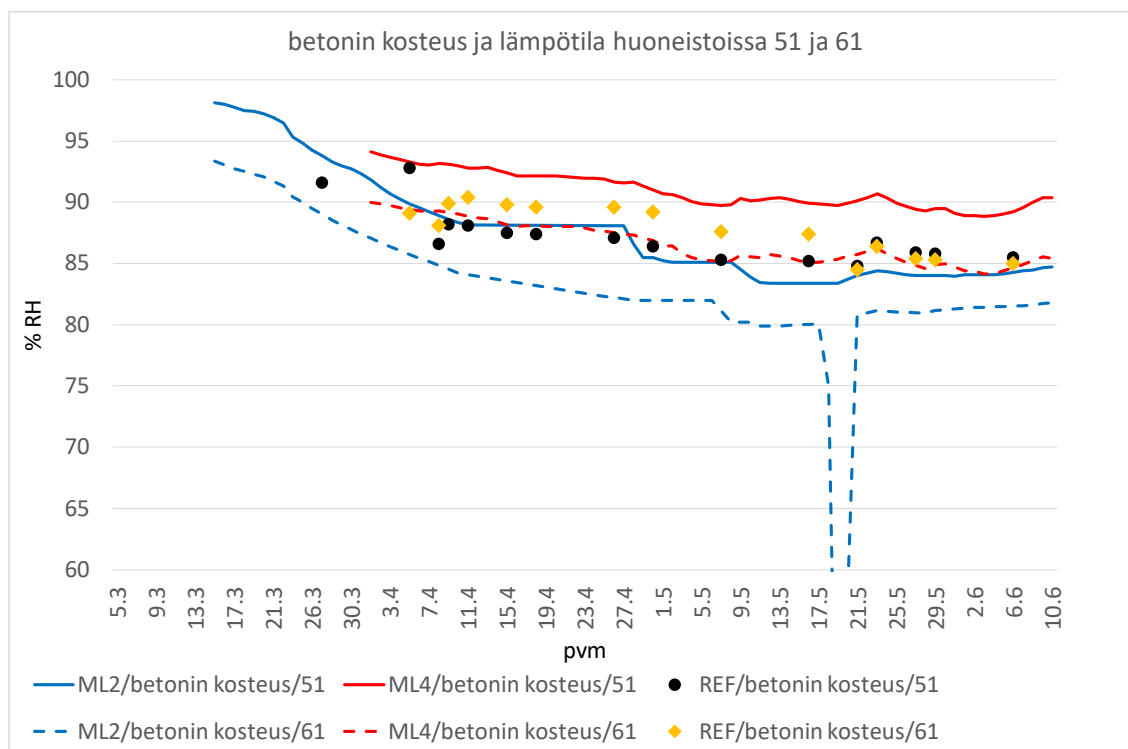
Kuvassa 18 nähdään mittalaitteiden 2, 3 ja 4 mitaamia betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja huoneistossa 61. Mustat pisteet ovat referenssimittauksella saatuja arvoja. Mittalaitteen 4 mitaamat betonin suhteellisen kosteuden arvot olivat selvästi lähimpänä referenssimittauksella saatuja arvoja. Mittalaitteen 2 mitaamat arvot olivat säännönmukaisesti noin 5 RH % pienempiä kuin referenssimittauksella mitatut arvot kun taas mittalaitteen 3 mitaamat arvot noin 5-10 RH % pienempiä. Mittalaitteiden 2, 3 ja 4 mitaamat arvot betonin lämpötiloista olivat pääosin hyvin lähellä toisiaan. Mittalaitteen 2 tiedonsiirrossa oli ajoittain ongelmia, mistä johtuu sinisissä käyrissä näkyvät epäloogisuudet. Analysoinnissa on käytetty viimeisintä mitattua arvoa jos päiväkohtaisia mittausarvoja on puuttunut.

6.5 Tulosten analysointi

Yksikään mittalaitteista ei ollut ylivertainen käytettävyyssanalyysissä muihin nähden. Mittalaite 1 oli hyvin asennusystävällinen mutta muissa arviointikriteereissä se pärjasi huonommin. Mittalaitteet 3 ja 4 olivat tasaisen hyviä ja saivat siksi parhaimmat käytettävyysspisteet. Käytettävyyssanalyysissä parhaimman kokonaisarvion käytettävyydestä sai mittalaite 4 pistemäärällä 78 pistettä.

Kaikilla mittalaitteilla pystyttiin mittaamaan sekä sisäilman että betonin lämpötilaa riittävän hyvin. Mittaustuloksista piirretyt käyrät olivat hyvin samanmuotoisia ja erot lämpötiloissa olivat pieniä. Myös sisäilman suhteellisen kosteuden mittaaminen onnistui kaikilta mittalaitteilta riittävän hyvin, jotta voitiin arvioida olivatko betonin kuivumisolosuhteet kunnossa. Lämpötilavaihteluiden aiheuttamat pienet mittausrvirheet betonin suhteellisen kosteuden mittaustuloksissa näkyivät kaikille mittalaitteille samalla tavalla eli vertailumielessä tällä virhelähteellä ei ollut merkitystä.

Betonin suhteellisen kosteuden mittaustulokset olivat osittain ristiriitaisia. Referenssimittauksissa oli havaittavissa selvä betonin suhteellisen kosteuden pieneminen mittausjakson aikana kaikissa huoneistoissa. Tämä on luonnollista, koska betonin oletetaan kuivuvan koko ajan. Sama ilmiö havaittiin selvästi mittalaitteella 2 ja 4 huoneistojen 51 ja 61 mittaustuloksista mutta ei läheskään yhtä selvästi huoneistojen 25 ja 37 mittaustuloksista mittalaitteella 2 ja 3. Ristiriitaiseksi tuloksen tekee se, että mittalaite 2 mittasi melko luotettavasti betonin suhteellista kosteutta ja sen muutosta huoneistoissa 51 ja 61 mutta ei huoneistoissa 25 ja 37. Huonoin tulos saatiin mittalaitteella 3, jolla ei pystytty juurikaan havaitsemaan missään huoneistossa betonin suhteellisen kosteuden pienemistä ajan funktiona. Lisäksi mittalaitteen 3 mittaustulokset jäivät säännönmukaisesti noin 5...10 % RH pienemmiksi kuin referenssimittauksella saadut mittausarvot. Eroa ei voida selittää pelkästään mittapäästä johtuvalla mittausvirheellä, joka toimittajan ilmoituksen mukaan pitäisi olla korkeintaan $\pm 1,8$ % RH tai pienempi.



KUVA 19. Betonin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vertailumittauksia huoneistoissa 51 ja 61.

Kuvassa 19 on analysoitu tarkemmin mittalaitteiden 2 ja 4 mittaamia betonin suhteellisen kosteuden arvoja huoneistoista 51 ja 61. Kuvasta voidaan nähdä, että molempien mittalaitteiden tuloksissa oli noin 5 % RH tasoero huoneistojen välillä siten, että betonin kosteus oli suurempi huoneistossa 51. Vastaava ilmiö näkyi referenssimittauksissa selkeästi pienempänä. Tasoerolle ei löydetty tämän tutkimuksen puitteissa selkeää syytä. Kaiken kaikkiaan mittalaitteiden 2 ja 4 mittaustulosten ero referenssimittauksiin näyttäisi olevan enimmillään luokkaa ± 5 % RH huoneistojen 51 ja 61 osalta sisältäen kaikki mittaukseen liittyvät virhelähteet.

7 POHDINTA

7.1 Mittalaitteiden käytettävyys

Betonin suhteellisen kosteuden mittalaitteen käytettävyys on tärkeä osa kokonaisuutta, jotta mittaukset onnistuvat luotettavasti rakennustyömaan kaikissa olosuhteissa. Käytettävyyttä voi aina kehittää kaikilla osa-alueilla mutta ehkä tärkeimmiksi kehityskohteiksi nostaisin asennusystävällisyyden, mekaanisen vaurioitumisen siedon ja tiedonsiirron lähetysvarmuuden kehittämisen. Esimerkiksi mittalaitteen 2 asennusputken kiinnitykseen voisi suunnitella holvimuottiin kiinnitettävän asennustuen, jonka avulla asennusputken kiinnittäminen helpottuu ja jolla asennussyvyys varmistetaan juuri halutuksi. Porareikään asennettavien mittalaitteiden mukana voisi tulla metallinen lattiaan kiinnitettävä suoja, joka parantaa niiden mekaanisen vaurioitumisen sietoa.

7.2 Kuivumisolosuhteiden arviointi

Betonirakenteilla on mahdollisuus kuivaa suunnitellun aikataulun puitteissa vain jos kuivumisolosuhteet ovat riittävän hyvät. Tämän takia kuivumisolosuhteita ja betonin suhteellisen kosteuden muutosta pitää mitata jatkuvasti ja riittävän tarkasti betonin kuivatusvaiheen aikana, jotta saadaan kokonaiskäsitys siitä mitä betonirakenteiden kuivumisessa tapahtuu. Tämän tiedon perusteella pystytään tekemään tarvittaessa nopeasti korjaavia muutoksia kuivumisolosuhteisiin sekä voidaan todentaa muutosten vaikutus. Langattomalla mittalaitteella saadaan helposti mittaustietoa kuivumisolosuhteista, joka voidaan esittää havainnollisesti graafisen käyrän muodossa. Siitä on paljon helpompi päätellä kuivumisolosuhteiden riittävyyttä kuin muutamista yksittäisistä sisäilman kosteuden ja lämpötilan mittaustuloksista kuivatusjakson aikana.

7.3 Betonin kuivumisen seuranta

Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen osoittautui odotetusti haastavaksi tehtäväksi erityisesti mittaustarkkuuden suhteen. Vertailussa mukana olleesta mittalaitteesta 1 ei saatu mittaustuloksia, koska laitteeseen tuli teknisiä ongelmia ennen mittausten aloitusta. Mittalaite 3 ei pystynyt erottamaan betonin suhteellisen kosteuden muutosta ja mittaustulokset olivat selvästi pienempiä kuin referenssimittauksella saadut tulokset. Mittalaite 2 antoi osittain ristiriitaisia mittaustuloksia mutta myös kelvollisia tuloksia, joten sen suorituskyvystä jäi ilmaan kysy-

mysmerkkejä. Parhaiten vertailututkimuksessa pärjasi kokonaisuutena mittalaite 4. Se sai parhaat pisteet käytettävyyssanalyysissä ja sen mittaustarkkuus oli vähintäänkin mittalaitteen 2 tasoa huoneistoissa 51 ja 61.

Tämän vertailututkimuksen mukaan mittalaitteilla 2 ja 4 pystyisi seuraamaan betonirakenteen suhteellisen kosteuden muutosta mutta absoluuttinen tarkkuus vaihtelee välillä ± 5 % RH. Tämän takia seurantamittaus edellyttäisi alkuun referenssimittauksia, jolla määritellään tarkasti betonin suhteellisen kosteuden lähtöarvo mittausten alkaessa. Referenssimittauksesta saadulla lähtöarvolla voidaan sitten kalibroida jatkuva seurantamittaus oikealla tasolle ja seurata betonin suhteellisen kosteuden muutosta ajan funktiona. Ennen päällystystöimenpiteiden aloittamista pitää betonirakenteen pinnoituskelpoisuus kuitenkin osoittaa asian-
tuntijan tekemän kosteusmittauksen perusteella.

Langattomalla betonin kosteusmittauksella on se etu nykytilanteeseen verrattuna, että sillä saadaan helposti jatkuvaa mittaustietoa siitä, miten betonirakenteen kuivuminen etenee ja mitkä ovat kuivumisolosuhteet. Kun tätä saatua mittaustietoa käytetään fiksusti hyväksi, voidaan entistä paremmin välttää betonin hitaasta kuivumisesta johtuvia aikatauluviiveitä sekä liian aikaista betonin päällystämistä. Langattomat betonin kosteusmittalaitteet ovat tulossa vahvasti rakennusteollisuuteen ja tarjoavat varteenotettavan työkalun betonirakenteiden kuivumisen hallintaan.

LÄHTEET

Yle Uutiset. 16.10.2018. Nyt se on selvitetty: Rakentamisen maine on mennyt. Luettu 22.8.2019. <https://yle.fi/uutiset/3-10458109/>

2018. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Helsinki: Suomen säädöskokoelma 782/2017.

2015. Kuivaketju10. Toimintaohjeet. Oulun rakennusvalvonta / RALA ry. Luettu 19.9.2019. <http://kuivaketju10.fi/>

RALA ry. Kuivaketju10-riskilista. Luettu 19.9.2019. http://kuivaketju10.fi/wp/wp-content/uploads/2018/03/Kuivaketju10-Riskilista_150313.pdf

Merikallio, T., Niemi, S. & Komonen, J. 2007. Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällästäminen. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Merikallio, T. 2002. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

RT 14-10984. 2010. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. Rakennustieto Oy. 2010. Julkaistu 2/2010.

Digita. Tekniikkaa, joka valloittaa vielä maailman – IoT on täynnä mahdollisuuksia. Luettu 9.10.2019. <https://digitamahdollistaa.fi/tekniikkaa-valloittaa-viela-maailman-iot-taynna-mahdollisuuksia/>

Käyttöohje. 2012. Rakenteiden kosteusmittauslaitepaketti Vaisala SHM40. Vaisala Oy. 2012.